

## ESTUDIO DEL ACIMUT PARA UN REFRIGERADOR SOLAR

Ernesto Cyrulies<sup>1</sup>, Andres Sartarelli<sup>1</sup>, Sergio Vera<sup>1</sup>, Rodolfo Echarri<sup>1,2</sup>, <sup>3</sup>Inna Samson

<sup>1</sup>Instituto de Desarrollo Humano, Universidad Nacional de General Sarmiento (IDH, UNGS)

J.M. Gutierrez 1150 Los Polvorines, Pcia. de Buenos Aires. [ecyrulie@ungs.edu.ar](mailto:ecyrulie@ungs.edu.ar)

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>3</sup>INTEC (Instituto Tecnológico Santo Domingo. Rep. Dominicana)

FONDOCYT 2008-2-E1-010

**RESUMEN:** En este artículo se establece que la orientación del colector de un refrigerador solar por adsorción, puede cambiarse a partir de la orientación clásica de los dispositivos de captación solar, hasta unos 20° hacia el este, sin que se modifique de manera apreciable el rendimiento del equipo. Esto se debe a que no sólo hace falta calentar el colector, sino que es necesario al mismo tiempo condensar el metanol desorbido, lo que resulta más sencillo durante las horas de menor temperatura ambiente puesto que el condensador del dispositivo emite el calor resultante de la condensación al medio ambiente.

**Palabras clave:** Eficiencia, refrigeración, adsorción.

### INTRODUCCION

Existen muchos tipos de dispositivos que hacen uso de la energía solar para diferentes fines. Entre ellos podemos considerar los paneles fotovoltaicos, los colectores para calentamiento de agua y también se tiene el caso de dispositivos que logran refrigeración a través de la captación de energía solar. En todos los casos captar la mayor cantidad de energía en un tiempo determinado constituye un desafío y una cuestión que puede convertirse en decisiva para el buen funcionamiento del dispositivo.

En el caso de colectores planos utilizados para calentamiento de agua, así como de paneles fotovoltaicos, se opta por orientar los captadores con una inclinación 10° por encima del valor de latitud. El mayor rendimiento se obtendría cuando la normal a su superficie captora apunte al Sol. Si esto es lo que se decide para todo momento del día, requerirá algún mecanismo de seguimiento de dicho astro. Por otro lado, debe considerarse que la declinación del Sol varía notablemente a lo largo del año, esta variación es, aproximadamente, de 47 grados lo que agrega otro grado de libertad para obtener la orientación óptima. Estas consideraciones pueden desanimar la construcción de dispositivos con mecanismos de seguimiento, particularmente si deben estar automatizados, como tal vez sea lo más adecuado, de lo contrario requerirán una atención permanente.

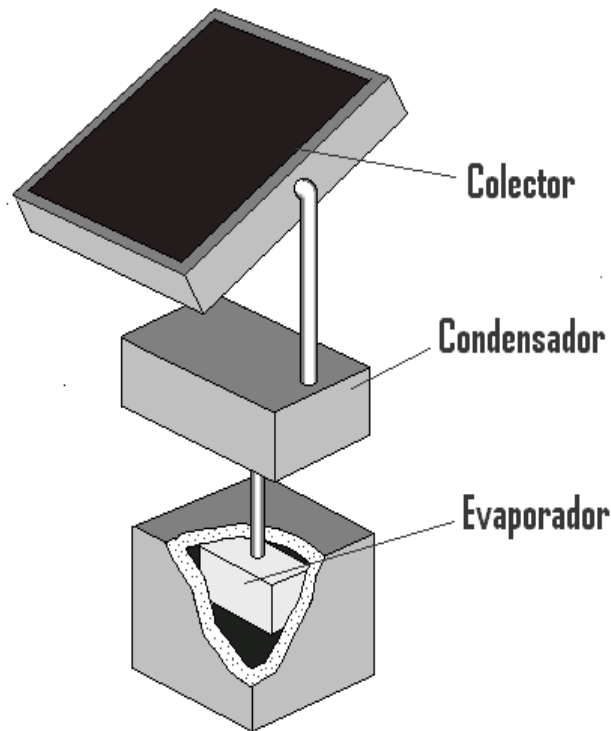
Debido a lo anterior, en muchas aplicaciones prácticas se decide por orientar el colector de manera permanente a un punto fijo de la bóveda celeste. Esto, obviamente, reduce la energía total que se capte, pero resulta ser una solución de compromiso con la que se obtiene una gran simplificación de montaje con la consecuente disminución de costos. Considerando que la trayectoria solar en la bóveda celeste es simétrica con respecto al meridiano local, y que el punto más alto de dicha trayectoria se encuentra en la intersección con dicho meridiano, es evidente que un plano de captación cuyo vector normal esté contenido en el plano meridiano obtendrá un mayor rendimiento (para una inclinación dada respecto de la horizontal). Esto significa que el panel tendrá un acimut ( $\gamma$ ) igual a cero (medido desde el norte, positivo hacia el este, negativo hacia el oeste).

Por otro lado, la declinación solar varía día a día, y si se elige un sistema inmóvil deberá elegirse algún valor intermedio en el cual no se vea seriamente afectada la eficiencia tanto en invierno como en verano. Como regla práctica, se acepta una inclinación ( $\beta$ ) respecto del plano horizontal de diez grados más que la latitud local ( $\phi$ ), el cual por convención es negativo para el hemisferio sur. Es decir que para el caso de la ciudad de Buenos Aires ( $\phi = -34,5^\circ$ ) un colector allí instalado, con dicho criterio, apuntaría al norte y con una inclinación de unos  $-45^\circ$  aproximadamente.

### REFRIGERADORES SOLARES

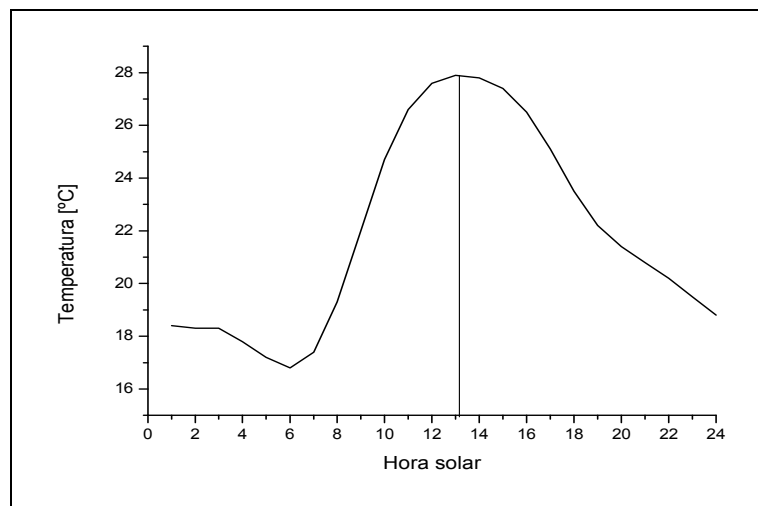
Con la disposición anterior no resulta evidente que se obtienen los mejores resultados cuando se trata de refrigeradores solares por adsorción. Para comprender esta cuestión, es preciso conocer básicamente el principio de funcionamiento de esta clase de equipos. Los mismos cuentan con tres componentes principales: colector, condensador y evaporador (ver figura 1).

La energía solar es utilizada para desorber algún tipo de fluido (metanol en nuestro caso) que se encuentra adsorbido sobre un lecho de carbón activado dentro del colector solar. Durante esta fase, dicho fluido alcanza el condensador y éste intercambia calor con el medio de modo que ya licuado, el fluido es recogido en el evaporador. Este proceso se invierte durante la noche, en la cual se produce nuevamente la evaporación e inmediata adsorción en el colector. Este último cambio de estado ocasiona que el evaporador tome calor del medio que lo rodea (cámara fría) produciendo, en nuestro caso, hielo que es utilizado con el propósito de la refrigeración. El ciclo, como puede entenderse, es diario. (Para más detalles ver “Construcción de una heladera solar por adsorción” Sergio Vera et al. Asades 2008).



*Figura 1: Componentes básicos de un refrigerador solar*

En el caso de un refrigerador solar, lo que puede establecer una diferencia en el criterio de orientación del colector, es la necesidad de condensar el fluido que se esté utilizando. El punto clave es que el condensador utilizado es un intercambiador de calor cuyo rendimiento depende de la temperatura ambiente. Por lo tanto, para la máxima irradiancia, la que se alcanza en el mediodía solar (con cielo claro), el condensador tendrá que liberarse del calor contra una temperatura ambiente mayor a la que tendría que hacerlo a horas mas tempranas. El proceso de desorción se producirá durante un intervalo temporal en el cual la irradiancia sea suficiente como para desorber y condensar una determinada cantidad de metanol. Pero es de presumir que el intervalo más adecuado no esté en torno al mediodía solar sino que se sitúe hacia horas más tempranas, cuando la temperatura ambiente es inferior. Esto último puede observarse en el diagrama (figura 2), correspondiente al 21/12 para la ciudad de Buenos Aires, (promedio de ocho años) en el cual se registran mayores temperaturas hacia la tarde.



*Figura 2: Temperatura ambiente en función de la hora solar*

Con la presunción de poder hacer un mejor uso de la energía solar de esta manera, se ha graficado la irradiancia para diferentes valores de acimut de un plano (con  $\beta$  fijo) en función de la hora. En la figura 3 se muestran a dichos gráficos para dos días particulares (solsticios) y con acimut igual a 0 y 45°.

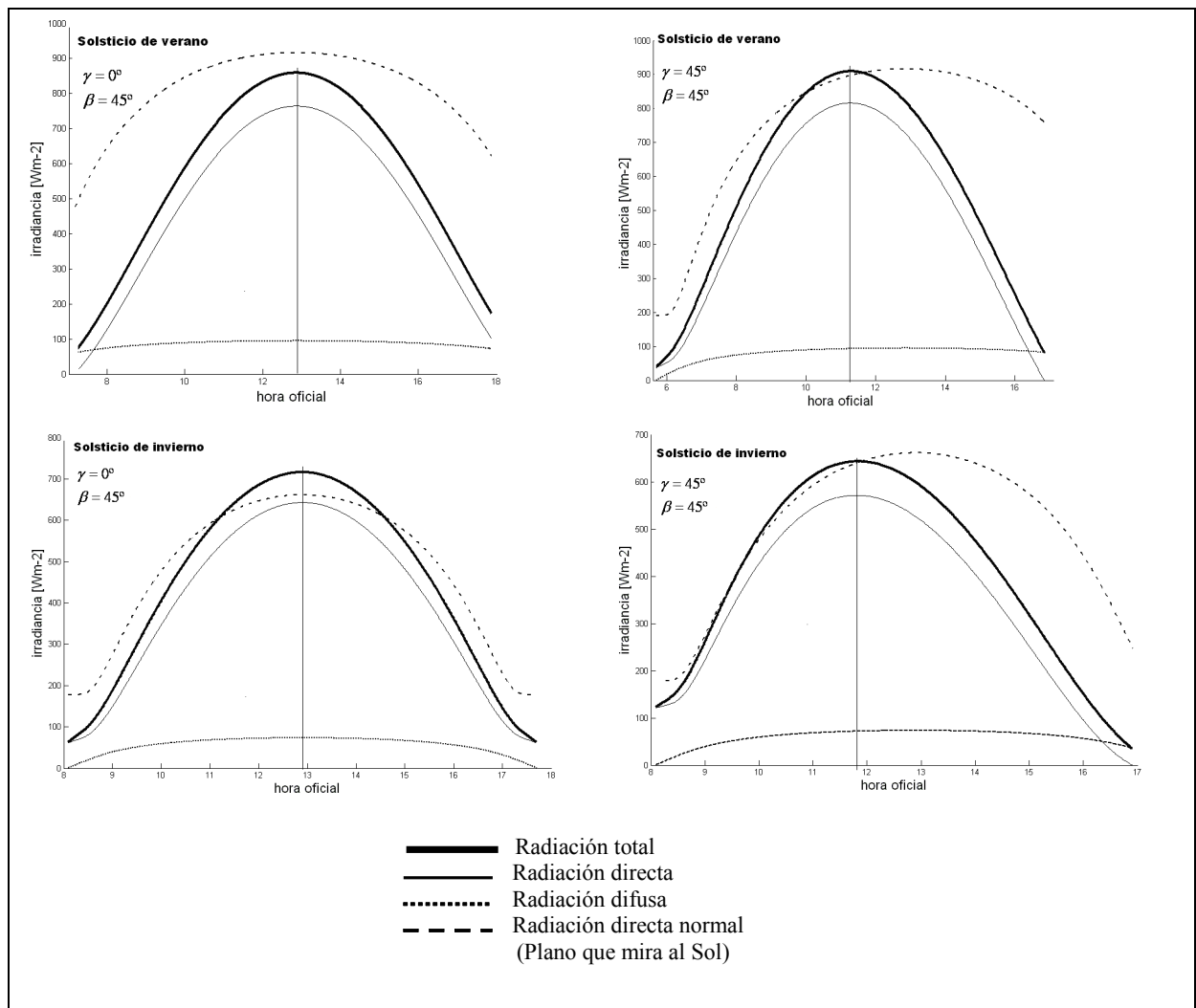


Figura 3: Irradiancia sobre plano inclinado para los dos solsticios con acimut  $0^\circ$  y  $45^\circ$

Puede verse que la acción de girar el colector un ángulo de  $45^\circ$  no afecta en gran medida la irradiancia recibida sobre el plano del mismo.

## DESARROLLO

Para determinar la posible mejor orientación del equipo se requiere conocer la temperatura ambiente para cada momento del día a lo largo del año. Se tomaron mediciones en los días en que el equipo se ensayó y para otros días del año, de los cuales no se tenía registros. Para esto se recurrió a datos que han sido otorgados por el Servicio Meteorológico Nacional en la ciudad de Buenos Aires.

Con los registros mencionados (de los últimos ocho años) se ha tomado un promedio para las mismas horas del día ajustando para los valores intermedios con un modelo adecuado, quedando entonces un registro cada 5 minutos.

Además se desarrolló un modelo (en C++) que hace uso de las ecuaciones propias de los estudios de aprovechamiento de energía solar. Con el mismo se obtuvo el valor de la irradiancia instantánea cada cinco minutos durante las horas de sol y en función del día juliano para nuestra posición geográfica.

En el modelo empleado se utilizan la irradiancia y la temperatura ambiente para determinar la temperatura del colector y con esto, la concentración de metanol en el colector cada cinco minutos considerando un estado estacionario. Se entiende que a menor concentración de metanol adsorbido se tendrá mayor cantidad en el evaporador, por lo cual es un indicativo de la cantidad de hielo que pueda producir el refrigerador para las mismas condiciones nocturnas.

Aún no se cuenta con mediciones sobre la temperatura del colector para los diferentes días del año (la cual depende esencialmente de la irradiancia y la temperatura ambiente), por esta razón se estimaron las temperaturas del colector a partir de unos pocos datos reales como se explica. En la figura siguiente pueden verse los valores de temperatura de colector en función de la irradiancia (promedio de tres días consecutivos del mes de marzo). A la derecha se tomaron los puntos

correspondientes a la mañana (puntos inferiores del primer gráfico) a partir de los cuales se estableció la correlación con la temperatura ambiente a través de un modelo válido para ese intervalo.

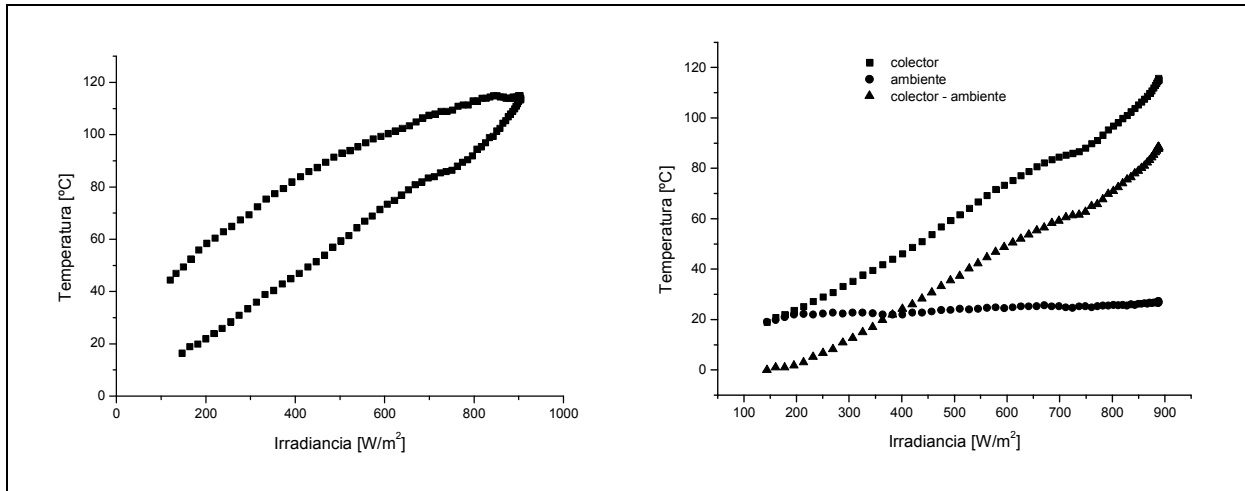


Figura 4: Valores de temperatura en función de la irradiancia

Luego, para obtener la concentración de metanol en el carbón activado se hizo uso de la ecuación de Dubinin - Raduskevich, la cual modeliza adecuadamente el comportamiento de nuestro refrigerador:

$$x = 0,316 e^{-1.12 \cdot 10^{-6} \left( T \ln\left(\frac{P_s}{P}\right) \right)^2} \quad (1)$$

Donde:

$x$ : Masa de metanol por unidad de masa de carbón activado.

$T$ : Temperatura del carbón activado en grados Kelvin.

$P$ : Presión de vapor de metanol en el sistema.

$P_s$ : Presión de saturación del metanol a la temperatura del carbón activado.

Las presiones indicadas se obtienen a partir de las temperaturas de colector y condensador.

## RESULTADOS

Los resultados preliminares obtenidos en el presente estudio no validan, en principio, la hipótesis de un aumento del rendimiento del equipo de refrigeración con acimut mayor a cero. Sin embargo, demuestran que un cambio en dicha orientación no afecta significativamente el rendimiento del equipo.

Si bien es cierto que la menor temperatura durante la mañana favorece la condensación del metanol, el gran aumento de la irradiancia en el mediodía solar compensa aquel efecto. Por otro lado, para el clima en el cual se ensaya nuestro equipo, no se tiene una gran amplitud térmica, la cual podría ser muy relevante para el comportamiento que esperábamos.

Dicho de otra manera, un primer resultado obtenido es que no es una cuestión tan crítica una precisa orientación del colector hacia el norte. Esto puede ser una ventaja a la hora de posicionar esta clase de equipos, particularmente cuando las condiciones del terreno no son las más adecuadas para una instalación con orientación rigurosa.

En las siguientes tablas se pueden ver los resultados obtenidos para la concentración de metanol en el carbón (peso en peso) dentro del colector, en función de los ángulos  $\beta$  y  $\varphi$  para algunos días particulares del año. Si bien se calcularon dichos valores cada 2,5° se muestra aquí sólo algunos representativos.

El ángulo cenital  $\varphi_z$  considerado en las tablas de doble entrada, es el correspondiente al mediodía solar y es igual a la latitud  $\phi$  menos la declinación del Sol en el mediodía solar de esa fecha. Para  $\beta$  se toma como punto de partida a  $\varphi_z$  (primera fila de cada tabla) y luego se adoptan valores mayores de  $\beta$  para el cálculo<sup>1</sup>. Todos estos ángulos, por simplicidad, se han redondeado en sus valores que aquí se muestran. Debajo de cada valor de concentración se indica la hora oficial correspondiente en la que se alcanza dicho valor (estado estacionario).

<sup>1</sup> En realidad, los valores de  $\beta$  son negativos para el hemisferio sur.

Fecha: 21/12 Declinación solar: -23° Ángulo cenital $\Theta_z$ : 11°							
	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 10^\circ$	$\gamma = 20^\circ$	$\gamma = 30^\circ$	$\gamma = 40^\circ$	$\gamma = 50^\circ$	$\gamma = 60^\circ$
$\beta = -11^\circ$	<b>0,01655</b>	0,01653	0,01664	0,01675	0,01688	0,01721	0,01752
hora	12:48	12:43	12:33	12:23	12:18	12:13	12:12
$\beta = -16^\circ$	0,01734	0,01732	0,01725	0,01722	0,01722	0,01743	0,01775
hora	12:48	12:53	12:28	12:18	12:13	12:03	11:58
$\beta = -21^\circ$	0,01925	0,01915	0,0190	0,01872	0,01851	0,01842	0,01864
hora	12:48	12:38	12:23	12:13	12:03	11:58	11:43
$\beta = -40^\circ$	0,04497	0,04407	0,04183	0,03874	0,03538	0,03234	0,03008
hora	12:48	12:28	12:08	11:48	11:33	11:18	11:03

Tabla 1: Concentraciones (peso en peso) calculadas para el 21/12

Fecha: 26/03 Declinación solar: 1,6° Ángulo cenital $\Theta_z$ : 36 °							
	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 10^\circ$	$\gamma = 20^\circ$	$\gamma = 30^\circ$	$\gamma = 40^\circ$	$\gamma = 50^\circ$	$\gamma = 60^\circ$
$\beta = -36^\circ$	<b>0,0378</b>	0,382	0,0394	0,0415	0,0450	0,0503	0,0591
hora	12:53	12:43	12:28	12:18	11:58	11:48	11:38
$\beta = -41^\circ$	0,0410	0,0412	0,0421	0,0440	0,0474	0,0530	0,0613
hora	12:48	12:38	12:23	12:03	11:53	11:33	11:23
$\beta = -55^\circ$	0,0594	0,0593	0,0584	0,0594	0,0615	0,0656	0,0739
hora	12:58	12:33	12:03	11:43	11:33	11:08	10:53
$\beta = -60^\circ$	0,0729	0,0732	0,0713	0,0704	0,0715	0,0748	0,0826
hora	12:58	12:43	12:03	11:43	11:23	11:08	10:53

Tabla 2: Concentraciones (peso en peso) calculadas para el 26/03

Fecha: 07/05 Declinación solar: 16,7° Ángulo cenital $\Theta_z$ : 51 °							
	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 10^\circ$	$\gamma = 20^\circ$	$\gamma = 30^\circ$	$\gamma = 40^\circ$	$\gamma = 50^\circ$	$\gamma = 60^\circ$
$\beta = -51^\circ$	<b>0,0673</b>	0,0682	0,0721	0,0794	0,0920	0,1102	0,1423
hora	12:43	12:23	12:08	11:53	11:38	11:23	11:08
$\beta = -61^\circ$	0,0765	0,0773	0,0807	0,0879	0,1000	0,1189	0,1482
hora	12:43	12:18	12:03	11:48	11:28	11:08	10:58
$\beta = -66^\circ$	0,0862	0,0866	0,0900	0,0971	0,1089	0,1276	0,1541
hora	12:43	12:23	11:53	11:40	11:23	11:03	10:48
$\beta = -81^\circ$	0,1435	0,1432	0,1449	0,1504	0,1615	0,1755	0,1874
hora	12:43	12:18	11:48	11:28	11:03	10:48	10:33

Tabla 3: Concentraciones (peso en peso) calculadas para el 07/05

Fecha: 21/06 Declinación solar: 23,4° Ángulo cenital $\Theta_z$ : 58°							
	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = 10^\circ$	$\gamma = 20^\circ$	$\gamma = 30^\circ$	$\gamma = 40^\circ$	$\gamma = 50^\circ$	$\gamma = 60^\circ$
$\beta = -58^\circ$	<b>0,1114</b>	0,1128	0,1173	0,1251	0,1367	0,1525	0,1728
hora	12:53	12:33	12:13	11:58	11:43	11:28	11:18
$\beta = -62^\circ$	0,1133	0,1146	0,1190	0,1268	0,1484	0,1544	0,1749
hora	12:53	12:33	12:13	11:58	11:40	11:23	11:13
$\beta = -67^\circ$	0,1215	0,1229	12,74	0,1354	0,1474	0,1638	0,1848
hora	12:53	12:33	12:13	11:53	11:38	11:23	11:08
$\beta = -77^\circ$	0,1362	0,1374	0,1416	0,1491	0,1606	0,1766	0,1972
hora	12:53	12:28	12:03	11:53	11:28	11:13	10:58

Tabla 4: Concentraciones (peso en peso) calculadas para el 21/06

De las tablas anteriores se desprende que rotar ligeramente hacia el este no compromete seriamente la desorción. Ésta, según nuestro estudio, para un acimut de 20° sólo se ve afectada en un 0,5 % para el solsticio de verano y en un 5,3 % hacia el solsticio de invierno aproximadamente.

En el siguiente gráfico (con datos del 07/05/10) puede observarse el efecto señalado. Al rotar 25° el colector hacia el este se consigue un efecto de adelantamiento del proceso de desorción, en 40 minutos aproximadamente, en tanto que la concentración del metanol en el colector es afectada alrededor del 6 %.

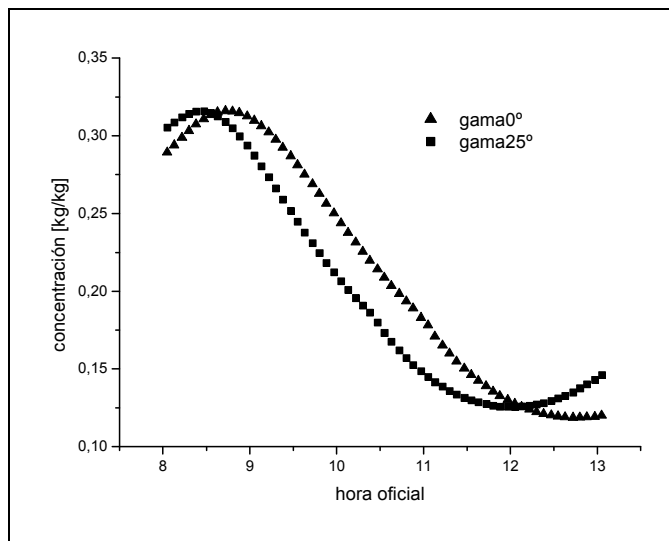


Figura 5: Concentración de metanol en función de la hora para dos valores de acimut

## CONCLUSIONES

Si bien los resultados preliminares no muestran que, efectivamente, mejore la eficiencia del refrigerador con un acimut mayor a cero, el estudio indica que dicha eficiencia no se ve afectada significativamente si el equipo es girado hacia el este unos pocos grados. Se espera con el presente trabajo iniciar un estudio más profundo a partir de una mejor modelización del condensador y del colector particularmente. Esto incluiría considerar el comportamiento no estacionario del equipo, lo que puede ser fundamental.

## REFERENCIAS

- Sergio Vera, Rodolfo Echarri, Andres Sartarelli, Ernesto Cyrulies, Inna Samson. Construcción de una heladera solar por adsorción. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 12 (03.01-03.05) (2008).
- Passamai, V. J. Determinación de la radiación solar horaria para días claros mediante planilla de cálculo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3 n° 2 (08.89-08.92) (2000).
- Gonzalez Martin Manuel Ivan. Refrigeración solar por adsorción con sistema de captación CPC: experimentos y modelo. Departamento de Física. Universidad de Burgos. (2006).

## BIBLIOGRAFIA

- Fernandez Diez Pedro. Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Universidad de Cantabria.

## ABSTRACT

This article states that the orientation of the collector of a solar adsorption refrigerator, can be changed from the classical orientation of solar collectors, to about the 20° to the east, without this significantly alter device performance. This is because not only need to heat the collector, but it is necessary at the same time condense desorbed methanol which is easier during the hours of lowest temperature since the condenser of the device emits heat from the condensation to the environment.

**Keywords:** Efficiency, refrigeration, adsorption.